

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.02.029

## 500 kV 输电铁塔覆冰风险评估与加固措施

文屹<sup>1</sup>, 陈易飞<sup>2</sup>, 毛先胤<sup>1</sup>, 吴建蓉<sup>1</sup>, 范强<sup>1</sup>, 阳林<sup>2</sup>

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002;

2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

**摘要:**输电线路覆冰可能导致输电铁塔倒塌、线路断线, 严重威胁电网的安全稳定运行。针对某地区的典型覆冰线路, 采用有限元仿真方法建立了 500 kV 塔线体系仿真模型, 并对均匀覆冰下不同覆冰厚度和不同风速等工况进行仿真分析, 统计 25 组仿真结果后获得了 500 kV 输电铁塔的薄弱点位置规律; 然后, 基于输电铁塔关键构件的轴向应力和节点位移, 进行输电铁塔运行风险评估分析, 并划分输电铁塔的运行风险状态; 最后, 进一步分析 2 类加固措施的效果, 得到加固前后输电铁塔不同薄弱点位置处轴向应力和节点位移的变化关系。仿真结果表明: 500 kV 输电铁塔的薄弱点位置主要分布在铁塔塔头地线支架处、上下曲臂连接处、瓶颈处以及铁塔的塔身处; 在均匀覆冰和风荷载作用下, 关键构件的轴向应力和节点位移均呈非线性增加; 拟合得到了输电铁塔安全、预警和危险状态临界表达式; 增加构件横截面积的加固效果优于改变薄弱点角钢结构, 后者加固前后输电铁塔薄弱点处的轴向应力和节点位移均无明显变化。

**关键词:**输电铁塔; 输电线路; 有限元仿真; 覆冰; 风险评估; 加固措施

**中图分类号:** TM754

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)02-0250-08

### 0 引言

大范围覆冰天气会导致输变电设备发生闪络跳闸, 引起输电线路金具损坏、线路断裂、铁塔倒塌, 甚至造成电网大面积瘫痪<sup>[1-5]</sup>。目前, 覆冰输电铁塔力学研究中真实实验成本较高, 而有限元仿真可以模拟输电铁塔在不同工况下的力学性能, 成本较低。

文献[6]以 500 kV 双回输电线路为研究对象建立耐张段模型, 仿真得到该耐张段在风荷载与冰荷载共同作用下的临界失效曲线, 并得出该耐张段中最薄弱输电铁塔位置及应力分布情况。文献[7]选取某 500 kV 输电线路微气候区内一个耐张段, 通过比较构件所受应力与屈服应力来判断输电铁塔出现失效风险的情况, 得出耐张段中最薄弱输电铁塔为 188 号输电铁塔, 并对其建立一塔两档模型, 以求解输电铁塔最薄弱位置。文献[8]以某地区 110 kV 输电铁塔为例, 分析得到输电铁塔在冰风荷载下的力学规律, 划分输电铁塔运行的失效状态, 得到了失效判据曲线。文献[9]以 500 kV 耐张塔为例, 在不考虑风荷载的情况下, 得到输电铁塔的应力分布, 并以输电铁塔两侧拉力为判据参数, 划分输电铁塔的不同运行风险状态临界失效曲线。文献

[10]以某地区 110 kV 输电线路为研究对象, 通过模拟 24 种仿真工况分析 3 种不均匀覆冰状态下杆塔两侧的导线张力以及轴向应力等变化。文献[11]以某 500 kV 输电线路为分析对象, 建立了杆塔的有限元仿真模型, 设定 33 种不均匀覆冰工况, 通过仿真分析得到杆塔上、中、下横担和杆塔塔身处应力与覆冰厚度增量间的变化关系, 认为不均匀覆冰工况下杆塔体系的应力值与档距参数有关。

但上述研究均未针对铁塔薄弱点进行加固措施的研究。文中以某地区重冰区典型 500 kV 覆冰输电线路为例, 首先, 建立 500 kV 铁塔有限元仿真模型以研究均匀覆冰条件下输电铁塔的力学特性规律; 然后, 进行 500 kV 输电铁塔的覆冰风险评估, 划分输电铁塔运行状态, 通过多项式拟合得到不同运行风险状态临界表达式; 最后, 分析 2 种加固措施的加固效果, 得到其加固前后轴向应力和节点位移的变化情况, 为输电铁塔的抗冰设计和运行提供参考。

### 1 冰风荷载作用下 500 kV 输电铁塔有限元分析

#### 1.1 工程实例

以某地区某 500 kV 线路耐张段为研究对象, 该耐张段所在冰区为 20 mm 冰区, 线路覆冰严重, 所在地面高程大于 1 000 m, 气象条件相对恶劣, 受气象环境影响严重。所研究的耐张段包括酒杯型直

收稿日期: 2022-09-25; 修回日期: 2022-11-21

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2019-A1515012122); 中国南方电网有限责任公司科技项目(066-600KK52190063)

线塔 A、酒杯型直线塔 B 和酒杯型直线塔 C 共计 3 基,导地线的型号分别为 LGJ-400/50 和 LBGJ100-20AC。酒杯型直线塔 A 与酒杯型直线塔 B 的档距和高差分别为 249 m 和 42.3 m,酒杯型直线塔 B 与酒杯型直线塔 C 的档距和高差分别为 484 m 和 35.8 m,酒杯型直线塔 B 与 A 和 C 的档距差较大。高差角和档距差过大是产生不平衡张力的主要原因,而不平衡张力会导致铁塔失稳<sup>[12-15]</sup>,故选择酒杯型直线塔 B(即输电铁塔 B)作为研究对象。图 1 为输电塔线体系断面图。

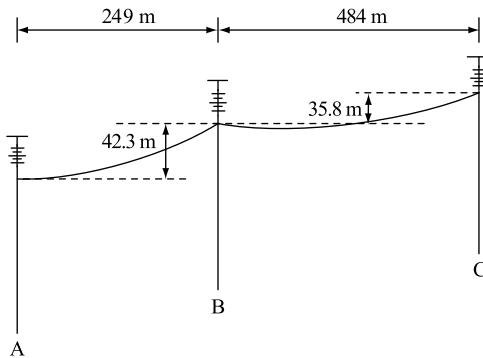


图 1 塔线体系断面

Fig.1 Cross section of tower line system

## 1.2 输电铁塔模型

输电铁塔 B 的角钢主材为 Q345 钢,斜材和辅材为 Q235 钢,角钢的材料属性见表 1。

表 1 角钢材料

Table 1 Material attributes of angle steel

型号	泊松比	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	杨氏模量/ ( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ )	初始屈服 应力/MPa
Q345	0.3	7 850	20 600	345
Q235	0.3	7 850	20 600	235

根据耐张段中的输电铁塔设计图纸建立输电铁塔 B 的有限元模型,如图 2 所示。

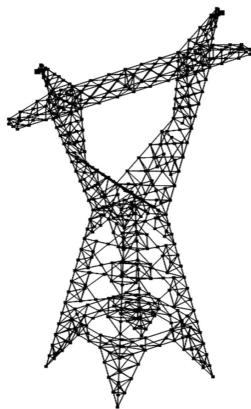


图 2 输电铁塔 B 有限元模型

Fig.2 Finite element model of transmission tower B

## 1.3 荷载计算

导地线自重单位荷载  $F_g$  是其单位长度的质量  $m_0$  与当地重力加速度  $g_b$  之积:

$$F_g = m_0 g_b \quad (1)$$

式中:  $g_b = 9.806 65 \text{ m/s}^2$ 。

导地线覆冰时单位长度导地线的冰荷载  $F_i$  为:

$$F_i = \frac{0.9\pi g_b}{4} [(D + 2b_{ice})^2 - D^2] \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中:  $D$  为导地线的计算外径;  $b_{ice}$  为导地线的均匀覆冰厚度。

导地线覆冰时单位水平风荷载  $F_y$  为:

$$F_y = W_0 (D + 2b_{ice}) \alpha \beta_c \mu_{sc} \mu_z \mu_\theta \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中:  $W_0$  为设计标准风速下的标准风压值;  $\alpha$  为风压不均匀系数;  $\beta_c$  为 500 kV 线路导地线风荷载调整系数;  $\mu_{sc}$  为导地线体形系数;  $\mu_z$  为风压高度变化系数;  $\mu_\theta$  为风向与导地线轴线间的夹角  $\theta$  引起的风压随风向变化的变化系数。

输电铁塔除本身荷载外,还承受导地线自重荷载和冰荷载所构成的垂直荷载,以及考虑最严重情况下(风向角为  $90^\circ$ ) 导地线的水平风荷载,这些荷载均等效施加在导地线与铁塔连接处。

## 1.4 仿真结果与条件

输电铁塔 B 的设计覆冰厚度为 20 mm,设计风速为 20 m/s。考虑到比较严重的气候条件,文中共进行 25 组冰风荷载组合(覆冰厚度  $d = 0 \text{ mm}$ 、10 mm、20 mm、30 mm 和 40 mm,风速  $v = 10 \text{ m/s}$ 、15 m/s、20 m/s、25 m/s 和 30 m/s)下的仿真。根据仿真得到了输电铁塔的轴向应力和节点位移的分布云图。

为了对比分析,举例给出了输电铁塔 B 在  $v = 30 \text{ m/s}$ 、无覆冰和均匀覆冰 20 mm 时的结果云图,分别如图 3、图 4 所示,(a)、(b) 图中红圈分别为轴向应力和节点位移最大值处。由图 3、图 4 可知,当  $v = 30 \text{ m/s}$ 、无覆冰时铁塔最大轴向应力集中在塔身处,最大轴向应力值为 34.46 MPa(主要考虑拉应力,负值表示压应力),最大节点位移集中在塔头地线支架处,最大节点位移值为 59.78 mm;当  $v = 30 \text{ m/s}$ 、均匀覆冰 20 mm 时,最大轴向应力迁移至铁塔瓶颈处,其值达到 44.73 MPa,而最大节点位移仍集中在塔头地线支架处,最大节点位移值达 84.16 mm。

此时可以发现,无覆冰时,铁塔最大轴向应力集中于铁塔塔身处;覆冰时,铁塔最大轴向应力集中于输电铁塔瓶颈处,铁塔的最大轴向应力随着覆冰厚度的增加而增加。无论有无覆冰,铁塔的最大

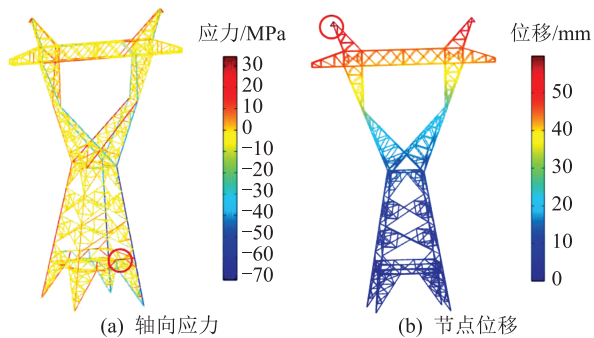


图3 无覆冰时输电铁塔 B 轴向应力和节点位移云图  
Fig.3 Cloud image of axial stress and node displacement of transmission tower B without icing

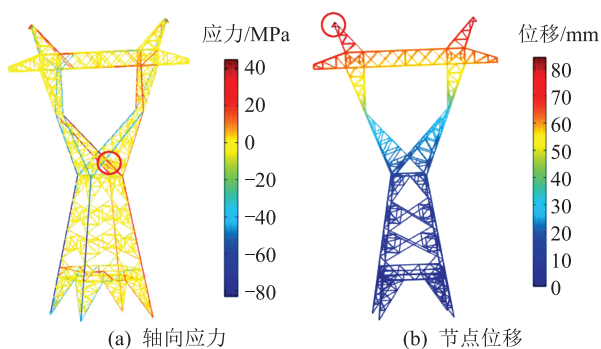


图4 覆冰时输电铁塔 B 轴向应力和节点位移云图  
Fig.4 Cloud image of axial stress and node displacement of transmission tower B under uniform icing conditions

节点位移都集中于输电铁塔塔头,且铁塔的最大节点位移随着覆冰厚度的增加而增加<sup>[16-17]</sup>。

### 1.5 薄弱点分布

通过对 25 组仿真工况下输电铁塔仿真结果的统计分析,得到了输电铁塔 B 的薄弱点(轴向应力和节点位移数值较大点)主要分布在输电铁塔塔头地线支架处(薄弱点 1)、上下曲臂连接处(薄弱点 2)、瓶颈处(薄弱点 3)以及铁塔塔身处(薄弱点 4),见图 5,其中红圈表示输电铁塔的薄弱点。

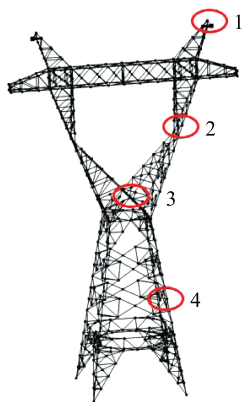


图5 输电铁塔 B 薄弱点位置  
Fig.5 Weak points of transmission tower B

当工况为  $d=0\text{ mm}$ 、 $10\text{ mm}$ 、 $v=10\text{ m/s}$ 、 $15\text{ m/s}$  和  $d=20\text{ mm}$ 、 $30\text{ mm}$ 、 $40\text{ mm}$ 、 $v=10\text{ m/s}$ 、 $15\text{ m/s}$ 、 $20\text{ m/s}$  时,铁塔最大轴向应力集中在塔头地线支架处,最大节点位移也集中在输电铁塔塔头地线支架处;当工况为  $d=0\text{ mm}$ 、 $10\text{ mm}$ 、 $v=20\text{ m/s}$ 、 $25\text{ m/s}$ 、 $30\text{ m/s}$  和  $d=20\text{ mm}$ 、 $30\text{ mm}$ 、 $40\text{ mm}$ 、 $v=25\text{ m/s}$ 、 $30\text{ m/s}$  时,铁塔最大轴向应力集中在瓶颈处,最大节点位移集中在塔头地线支架处。

将轴向应力和节点位移数值最大点处,即铁塔塔头地线支架处(薄弱点 1)构件和瓶颈处(薄弱点 3)构件定义为关键构件。文中将着重分析在不同覆冰厚度和风速下,输电铁塔关键构件的轴向应力和节点位移与风速的关系。

### 1.6 关键构件力学特性分析

图 6 为输电铁塔 B 瓶颈处构件在 25 种覆冰工况下轴向应力  $f$  与风速  $v$  的关系。由图 6 可知,随着风速的增加,在不同的覆冰厚度下,轴向应力均逐渐增加,而且这种增加是非线性的;覆冰厚度越大,轴向应力值越大。

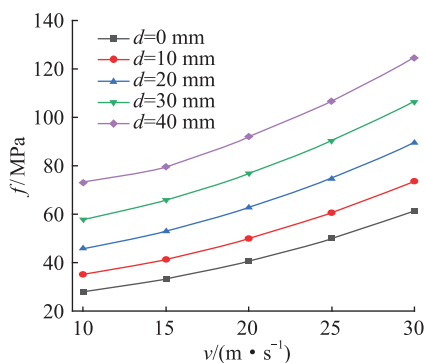


图6 不同覆冰厚度时轴向应力随风速变化曲线  
Fig.6 Variation curves of axial stress with wind speed at different ice thicknesses

对图 6 结果进行曲线拟合,得到了铁塔瓶颈处构件的轴向应力和风速的拟合表达式,如表 2 所示。轴向应力  $f$  与风速  $v$  的拟合函数为指数函数,曲线的拟合度  $R^2$  在 0.99 以上。

表2 轴向应力与风速关系曲线函数拟合  
Table 2 Curve function fitting of the relationship between axial stress and wind speed

$d/\text{mm}$	函数表达式	$R^2$
0	$f=18.746e^{0.0395v}$	0.999 1
10	$f=24.139e^{0.0371v}$	0.999 1
20	$f=32.582e^{0.0335v}$	0.998 8
30	$f=42.179e^{0.0307v}$	0.998 4
40	$f=54.669e^{0.0270v}$	0.992 4

图 7 为输电铁塔 B 塔头地线支架处构件在 25

种覆冰工况下节点位移和外部荷载的模拟结果。由图 7 可知,在覆冰厚度不变的情况下,塔头地线支架处构件的节点位移  $y$  随风速  $v$  的增加呈非线性增加。当  $d=10\text{ mm}$  时,风速从  $10\text{ m/s}$  增加到  $30\text{ m/s}$ ,节点位移从  $16.338\text{ mm}$  增加到  $70.949\text{ mm}$ ;  $d=40\text{ mm}$  时,风速从  $10\text{ m/s}$  增加到  $30\text{ m/s}$ ,位移从  $79.026\text{ mm}$  增加到  $134.337\text{ mm}$ 。即随着覆冰厚度的增加,风速对节点位移的影响更大。

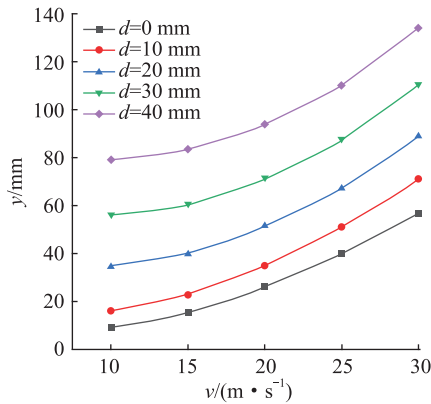


图 7 不同覆冰厚度下节点位移随风速变化曲线

Fig.7 Variation curves of nodal displacement with wind speed at different ice thicknesses

对仿真数据进行拟合,得到了塔头地线支架处构件的节点位移和风速的拟合表达式,如表 3 所示。节点位移  $y$  与风速  $v$  的拟合函数为指数函数,拟合度  $R^2$  在  $0.96$  以上。

表 3 节点位移与风速关系曲线函数拟合

Table 3 Curve functions fitting of the relationship between nodal displacement and wind speed

$d/\text{mm}$	函数表达式	$R^2$
0	$y = 3.6708e^{0.0939v}$	0.9886
10	$y = 7.7249e^{0.0746v}$	0.9979
20	$y = 20.442e^{0.0480v}$	0.9917
30	$y = 37.607e^{0.0345v}$	0.9774
40	$y = 57.614e^{0.0268v}$	0.9665

## 2 冰风荷载作用下 500 kV 输电铁塔运行风险评估

为给覆冰条件下输电线路和铁塔的安全运行提供理论指导,直观地描述实际冰风荷载作用下输电铁塔的运行安全等级,开展了输电铁塔的运行状态风险评估。冰风荷载下铁塔风险评估流程如图 8 所示。

采集输电铁塔关键构件的轴向应力  $f$ 、节点位移  $y$ 、铁塔高度  $h$  等参数;计算得到钢材的应力比  $\xi$  (主材或斜材轴向应力  $f$  与其屈服应力的比值);参照如表 4 所示的输电铁塔的失效评估标准<sup>[18]</sup>,考虑到该

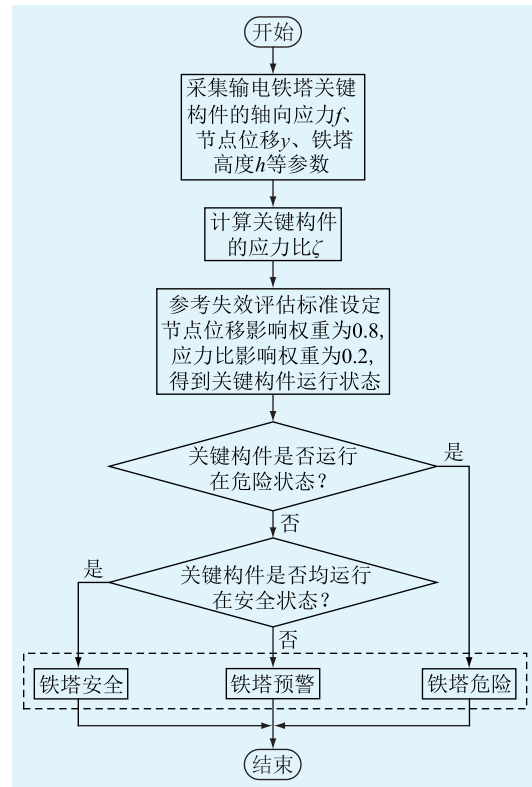


图 8 风险评估流程

Fig.8 Flow chat of risk assessment

500 kV 输电铁塔近 3 a 的运行数据,在覆冰灾害中因铁塔关键构件节点位移较大而发生事故的次数约占总故障次数的 80%,因铁塔关键构件应力较大而发生事故的次数约占总故障次数的 20%,结合文献[13-14],设定节点位移影响权重为 0.8,应力比影响权重为 0.2,根据权重分配,得到关键构件的运行状态(安全、预警、危险)。当出现关键构件运行在危险状态时,输电铁塔的运行风险等级为危险;当所有关键构件均运行在安全状态时,输电铁塔的运行风险等级为安全;其他情况下,输电铁塔的运行风险等级为预警。

表 4 输电铁塔失效评估标准

Table 4 Failure assessment criterion of the transmission tower

量化参数	安全	预警	危险
应力比	斜材 $\xi < 1.0$	$1.0 \leq \xi \leq 1.15$	$\xi > 1.15$
	主材 $\xi < 0.8$	$0.8 \leq \xi \leq 1.15$	$\xi > 1.15$
节点位移/mm	$y < \frac{h}{1000}$	$\frac{h}{1000} \leq y \leq \frac{3h}{1000}$	$y > \frac{3h}{1000}$

根据表 2 中的轴向应力表达式、表 3 中的节点位移表达式、表 4 中的失效评估标准、图 8 的输电铁塔运行风险评估流程和文中的仿真结果,划分了不同冰风荷载作用下输电铁塔 B 的运行风险等级,如图 9 所示。

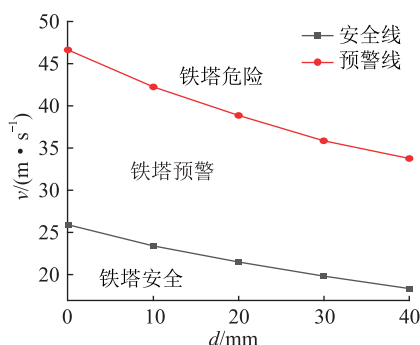
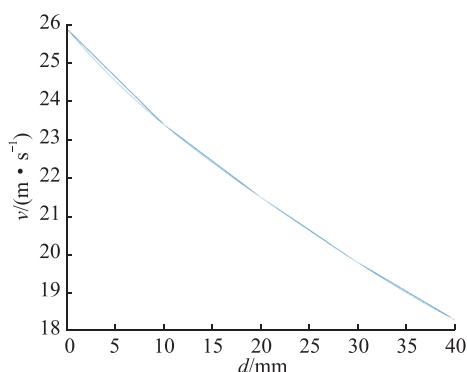


图9 均匀覆冰工况下输电铁塔运行状态范围

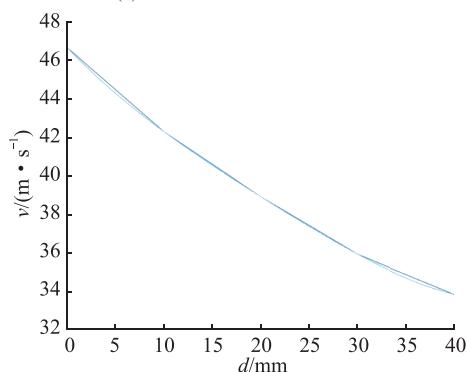
Fig.9 State range of the transmission tower under uniform icing condition

为了更直观地描述输电铁塔 B 在不同风速和均匀覆冰厚度下杆塔的运行风险等级,对仿真结果进行多项式曲线拟合,如图 10 所示,此时  $R^2=1$ 。由图 10 可得输电铁塔安全和预警等级下的临界表达式(临界风速  $v'$  与基本冰厚  $d'$ ):

$$v' = 1.7e^{-6}d'^4 - 0.00017d'^3 + 0.0068d'^2 - 0.3d' + 26 \quad (4)$$



(a) 安全-预警临界状态曲线拟合



(b) 预警-危险临界状态曲线拟合

图 10 临界状态曲线拟合

Fig.10 Curve fitting of critical state

当风速与覆冰厚度满足式(4)时,输电铁塔 B 存在进入预警等级的风险,此时铁塔薄弱点处承受荷载超过其承受极限,薄弱点处构件可能出现塑性变形。

拟合输电铁塔预警和危险等级下的临界表

达式:

$$v' = 4.6e^{-6}d'^4 - 0.00037d'^3 + 0.013d'^2 - 0.54d' + 47 \quad (5)$$

当风速与覆冰厚度满足式(5)时,输电铁塔 B 存在进入危险等级的风险,此时铁塔的薄弱点处构件将会出现严重的塑性形变,且铁塔不再保持平衡状态,甚至可能会发生坍塌,因此有必要进行加固措施的研究。

### 3 500 kV 输电铁塔加固措施

目前,对于输电铁塔结构的加固方法各不相同<sup>[19-21]</sup>,主要的输电铁塔加固思路有 2 个方案:一是直接采用更高规格的构件替换输电铁塔中易发生破坏的薄弱构件,以加强其承载能力;二是在输电铁塔的主材上通过各种方法增加辅材。为对 2 类措施加固前和加固后进行对比分析,结合某地区实际气象条件,设定一组比较严重的工况( $d=30\text{ mm}$ 、 $v=30\text{ m/s}$ ),分析 2 类加固措施加固前、后铁塔薄弱点处的轴向应力和节点位移的变化情况<sup>[22-25]</sup>。

#### 3.1 增加构件横截面积(方案 1)

输电铁塔上下曲臂连接处初始构件为 L45×4,横截面积为  $3.49\text{ cm}^2$ ;瓶颈处初始构件为 L110×8,横截面积为  $17.24\text{ cm}^2$ ;塔身处初始构件为 L140×12,横截面积为  $32.51\text{ cm}^2$ 。考虑到这些薄弱点存在风险,将上下曲臂连接处构件更改为 L63×6,横截面积变为  $7.29\text{ cm}^2$ ;瓶颈处初始构件更改为 L125×10,横截面积变为  $24.37\text{ cm}^2$ ;塔身处初始构件更改为 L160×12,横截面积变为  $37.44\text{ cm}^2$ 。之后对薄弱点 1、2、3、4(输电铁塔塔头地线支架处、上下曲臂连接处、瓶颈处以及输电铁塔塔身处)构件进行仿真分析。

图 11、图 12 为铁塔 4 个薄弱点处加固前和加固后轴向应力和节点位移的变化情况。

由图 11、图 12 可知,对于塔头地线支架处(薄弱点 1)的构件,其加固前后,节点位移减小了 5.08%,轴向应力几乎不变;对于铁塔上下曲臂连接处(薄弱点 2)的构件,其加固前后节点位移减少了 7.26%,而轴向应力增加了 0.95%;对于铁塔瓶颈处(薄弱点 3)的构件,其加固前后轴向应力和节点位移分别减小了 24.66%和 6.67%;对于塔身处(薄弱点 4)的构件,其加固前后轴向应力和节点位移分别减小了 6.19%和 0.55%。因此,增加构件横截面积后,输电铁塔薄弱点处构件轴向应力和节点位移整体改善明显,该加固措施有效。

#### 3.2 改变薄弱点角钢结构(方案 2)

输电铁塔塔头地线支架处初始构件型号为

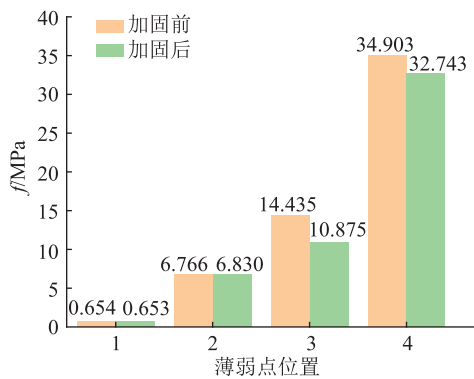


图 11 加固前后薄弱点处轴向应力数值变化(方案 1)

Fig.11 Numerical changes of axial stress at weak points before and after reinforcement (scheme 1)

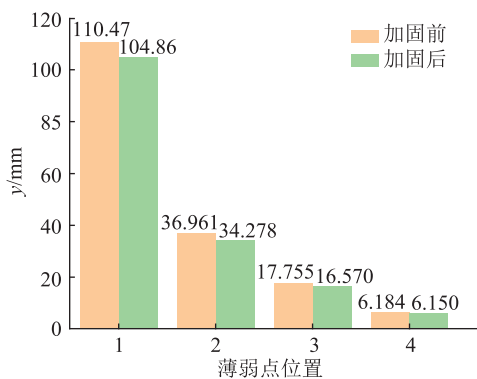


图 12 加固前后薄弱点处节点位移数值变化(方案 1)

Fig.12 Numerical changes of node displacement at weak points before and after reinforcement (scheme 1)

L40×4,上下曲臂连接处初始构件为 L45×4,瓶颈处初始构件为 L70×6,角钢截面均为 L 形截面。在主材上添加对称辅材,将 L 形截面改为 T 形截面,对薄弱点 1、2、3、4 进行仿真分析。

图 13、图 14 为铁塔 4 个薄弱点处加固前和加固后轴向应力和节点位移的变化情况。

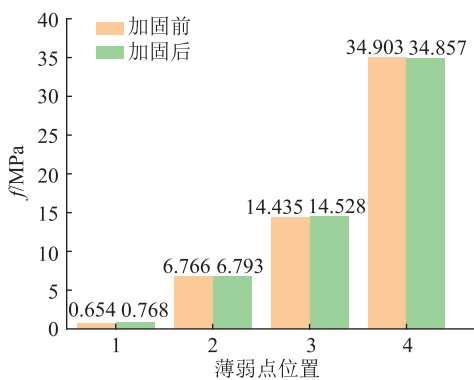


图 13 加固前后薄弱点处轴向应力数值变化(方案 2)

Fig.13 Numerical changes of axial stress at weak points before and after reinforcement (scheme 2)

由图 13、图 14 可知,对于塔头地线支架处(薄弱点 1)、铁塔上下曲臂连接处(薄弱点 2)、铁塔瓶

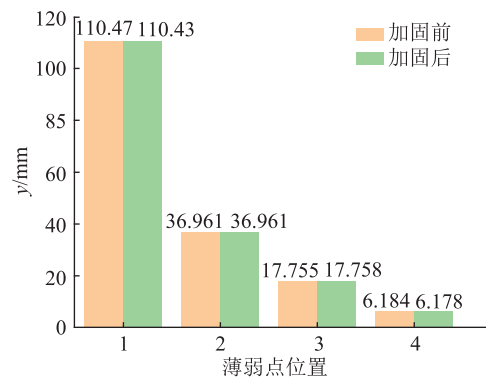


图 14 加固前后薄弱点处节点位移数值变化(方案 2)

Fig.14 Numerical changes of node displacement at weak points before and after reinforcement (scheme 2)

颈处(薄弱点 3)和塔身处(薄弱点 4)的构件,其加固前后的节点位移均无明显变化,说明外加冰风荷载的大小不影响加固前后薄弱点处构件的节点位移变化。对于薄弱点 1、2、3 处构件,其加固后的轴向应力均增加了,其中薄弱点 1 处构件增加了 17.43%,增加最多。因此,通过改变薄弱点角钢结构来加固该典型 500 kV 输电铁塔并不合适。

## 4 结论

(1) 500 kV 输电铁塔的薄弱点(轴向应力和节点位移较大点)主要分布在塔头地线支架处、上下曲臂连接处、瓶颈处以及塔身处,因此文中关键构件为塔架瓶颈处、塔头地线支架处和铁塔瓶颈处构件。

(2) 当导线均匀覆冰且风向平行于横担时,500 kV 输电铁塔关键构件的轴向应力和节点位移与风速呈非线性指数型增长关系,轴向应力和节点位移对风速的变化率随覆冰厚度的增加而增加,且随着覆冰厚度的增加,风速对节点位移的影响更大。

(3) 结合输电铁塔的力学失效标准,根据铁塔关键构件的运行状态,将 500 kV 输电铁塔的运行风险等级分为安全、预警、危险,拟合得到了不同运行风险状态的临界表达。

(4) 分析了 500 kV 输电铁塔在 2 种加固措施加固前后的轴向应力和节点位移的变化情况,发现增加构件横截面积的加固效果要好于改变角钢结构。改变角钢结构前后,输电铁塔不同薄弱点位置的节点位移无明显变化,部分薄弱点处轴向应力反而出现增大趋势,说明该加固措施无效。

### 参考文献:

- [1] 孙立强,李鹏,刘宣廷,等.考虑连锁故障的覆冰灾害下输电线路脆弱性分析模型[J].高压电器,2022,58(1):155-161,169.

- SUN Liqiang, LI Peng, LIU Xuanting, et al. Analysis model of transmission line under ice coating disaster considering cascading fault[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 155-161, 169.
- [2] 张瑚, 吕健双, 汪峰, 等. 基于塔线体系的中冰区分裂导线不均匀脱冰跳跃研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10): 204-207, 198.  
ZHANG Hu, LYU Jianshuang, WANG Feng, et al. Research on uneven-ice-shedding jump of bundled conductors in middle ice area based on tower-line system[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(10): 204-207, 198.
- [3] JI K P, RUI X M, LI L, et al. Dynamic response of iced overhead electric transmission lines following cable rupture shock and induced ice shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2215-2222.
- [4] YANG Z Y, JIANG X L, HUANG Y F, et al. Influence of electric field on the ice-coating process of insulators with a different dielectric surface[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2020, 14(5): 585-592.
- [5] 陆兴华, 吴佰建, 郭小明. 复合横担覆冰断线的动力分析与强度设计[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 193-198.  
LU Xinghua, WU Baijian, GUO Xiaoming. Dynamic analysis and strength design of composite cross arm considering icing conductor-breaking effects[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 193-198.
- [6] ZHANG J, XIE Q. Failure analysis of transmission tower subjected to strong wind load[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 160: 271-279.
- [7] ALBERMANI F, KITIPORNCHAI S, CHAN R W K. Failure analysis of transmission towers[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(6): 1922-1928.
- [8] ALBERMANI F G A, KITIPORNCHAI S. Numerical simulation of structural behaviour of transmission towers[J]. Thin-Walled Structures, 2003, 41(2/3): 167-177.
- [9] 张健, 李小亭, 张博, 等. 新疆地区 750 kV 线路覆冰与脱冰事故分析[J]. 浙江电力, 2020, 39(10): 58-62.  
ZHANG Jian, LI Xiaoting, ZHANG Bo, et al. Analysis of icing and ice shedding failures on 750 kV transmission lines in Xinjiang[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(10): 58-62.
- [10] 王燕, 皇甫成, 杜志叶, 等. 覆冰情况下输电线路有限元计算及其结构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 99-106.  
WANG Yan, HUANGFU Cheng, DU Zhiye, et al. Finite element calculation and structural optimization method for the high voltage transmission line under icing condition[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 99-106.
- [11] 刘超, 阮江军, 甘艳, 等. 覆冰条件下架空输电线路薄弱点分析[J]. 电瓷避雷器, 2016(2): 1-5, 11.  
LIU Chao, RUAN Jiangjun, GAN Yan, et al. Analysis of weak-point in overhead line under icing condition[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(2): 1-5, 11.
- [12] 念路鹏, 阳林, 郝艳捧, 等. 均匀覆冰时重冰区 110 kV 直线塔关键构件的受力分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(1): 15-22.  
NIAN Lupeng, YANG Lin, HAO Yanpeng, et al. Forces analysis on key components of 110 kV tangent tower with uniform icing in heavy icing area[J]. Smart Power, 2020, 48(1): 15-22.
- [13] 张厚荣, 张力, 杨跃光, 等. 覆冰工况下耐张塔失效预警技术研究[J]. 南方电网技术, 2018, 12(1): 33-40.  
ZHANG Hourong, ZHANG Li, YANG Yueguang, et al. Research on failure warning technology of strain tower under icing condition[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(1): 33-40.
- [14] 刘文峰, 袁翔, 何宝成, 等. 不均匀覆冰对 110kV 杆塔的受力影响分析[J]. 广东电力, 2019, 32(11): 136-143.  
LIU Wenfeng, YUAN Xiang, HE Baocheng, et al. Analysis of influence of uneven icing on stress of 110 kV tower[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11): 136-143.
- [15] 周文武, 张小力, 江岳, 等. 单档不均匀覆冰下架空线路不平衡张力及形变特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(9): 45-50.  
ZHOU Wenwu, ZHANG Xiaoli, JIANG Yue, et al. Characteristics of unbalanced tension and relative displacement in overhead power lines under non-uniform accreted ice[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(9): 45-50.
- [16] 刘堃, 白强. 500 kV 酒杯塔和干字型耐张塔设计与优化[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 125-131.  
LIU Kun, BAI Qiang. Design and optimization on 500 kV cup tower and JG type tension tower[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 125-131.
- [17] 麻卫峰, 王成, 王金亮, 等. 基于激光点云的高压输电线覆冰厚度反演[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 89-95.  
MA Weifeng, WANG Cheng, WANG Jinliang, et al. Inversion of ice thickness for high voltage transmission line based on a LiDAR point cloud[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 89-95.
- [18] 何思阳. 基于主成分分析算法的综合考虑多因素输电线路灾害风险评估研究[J]. 电工技术, 2022(3): 25-26, 30.  
HE Siyang. Research on transmission line disaster risk assessment considering multiple factors based on principal component analysis algorithm[J]. Electric Engineering, 2022(3): 25-26, 30.
- [19] 黄晓予, 阮筱菲, 陈俊. 浅析输电铁塔结构加固方法[J]. 能源与环境, 2022(5): 29-31.  
HUANG Xiaoyu, RUAN Xiaofei, CHEN Jun. Analysis on structural reinforcement method of transmission tower[J]. Energy and Environment, 2022(5): 29-31.
- [20] LU C H, MA X, MILLS J E. Modeling of retrofitted steel transmission towers[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 112: 138-154.
- [21] 姜岚, 罗曼平, 黄力, 等. 复合横担杆塔不平衡张力调节装置及其设计方法研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(5): 100-105.  
JIANG Lan, LUO Manping, HUANG Li, et al. Unbalance tension adjusting device and design method of composite cross

- arm tower[J]. Smart Power, 2022, 50(5):100-105.
- [22] LU C H, MA X, MILLS J E. The structural effect of bolted splines on retrofitted transmission tower angle members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 95:263-278.
- [23] 谢强, 阎启, 李杰. 横隔面在高压输电塔抗风设计中的作用分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(4):1-4.  
XIE Qiang, YAN Qi, LI Jie. Effects of diaphragm on wind resistant design of power transmission towers [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4):1-4.
- [24] 谢强, 丁兆东, 赵桂峰, 等. 不同横隔面配置方式的输电塔抗风动力响应分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(3):683-688.  
XIE Qiang, DING Zhaodong, ZHAO Guifeng, et al. Wind resistant analysis of power transmission tower with different diaphragm arrangements [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3):683-688.
- [25] 张峰, 李鹏云. 基于塔-线体系的输电塔覆冰加固有限元分析[J]. 广东电力, 2011, 24(11):78-81.  
ZHANG Feng, LI Pengyun. Finite element analysis based on tower-line system of ice-covering reinforcement of transmission towers [J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(11):78-81.

作者简介:



文屹

文屹(1972),男,硕士,高级工程师,从事电网运行相关工作(E-mail:1240866196@qq.com);

陈易飞(1999),男,硕士在读,研究方向为输变电设备外绝缘和极端条件下输电线路运行安全数字化关键技术;

毛先胤(1984),男,硕士,高级工程师,从事输电线路及电力电缆相关工作。

## Icing risk assessment and reinforcement measures of 500 kV transmission tower

WEN Yi<sup>1</sup>, CHEN Yifei<sup>2</sup>, MAO Xianyin<sup>1</sup>, WU Jianrong<sup>1</sup>, FAN Qiang<sup>1</sup>, YANG Lin<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** The existing of transmission line icing may lead to the collapse of the transmission tower and disconnection of the transmission line, which seriously threatens the safe and stable operation of power grid. In this paper, aiming at the typical icing lines in Guizhou, the simulation model of 500 kV tower-line system is established by finite element simulation method, and the simulation analysis of different icing thicknesses and different wind speeds under uniform icing is carried out. The weak point position rules of 500 kV transmission tower are obtained by counting 25 groups of simulation results. Then, based on the axial stress and node displacement of the weak components of the transmission tower, the operational risk assessment analysis of the transmission tower is carried out, and the operational risk state of the transmission tower is divided. Furthermore, the effect analysis of two kinds of reinforcement measures is carried out, and the relationship between axial stress and node displacement at different weak points of the transmission tower before and after reinforcement is obtained. The results show that the weak points of the 500 kV transmission tower are mainly distributed at the ground bracket of the tower head, the joint of the upper and lower curved arms, the bottle neck and the body of the tower. Under uniform icing and wind load, the axial stress and node displacement of key components increase nonlinearly. The critical expressions of safety, warning and dangerous state of the transmission tower are fitted. The reinforcing effect of increasing the cross-sectional area of components is better than that of changing the angle steel structure with weak points. The axial stress and joint displacement of the transmission tower at the weak point have no obvious change before and after reinforcement when changing the angle steel.

**Keywords:** transmission tower; transmission line; finite element simulation; icing; risk assessment; reinforcement measures

(编辑 陆海霞 江林)